



高炉操業の高効率化と低炭素化に向けた高炉内通気性改善技術に関する研究

著者	村尾 明紀
号	62
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5491号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00124974

氏 名	むら お あき のり
授 与 学 位	村 尾 明 紀
学 位 授 与 年 月 日	博士（工学）
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	平成30年3月27日
研究科，専攻の名称	学位規則第4条第1項
学 位 論 文 題 目	学位授与の根拠法規
指 導 教 員	研究科，専攻の名称
論 文 審 査 委 員	学 位 論 文 題 目
	に関する研究
	指 導 教 員
	東北大学教授 青木 秀之
	主査 東北大学教授 青木 秀之
	東北大学教授 猪股 宏
	東北大学教授 塚田 隆夫

論文內容要旨

【第1章】 近年、鉄鋼業においては地球温暖化に代表される環境問題へ対応するため、CO₂排出量の約7割を占める製鉄工程の中でも、特に高炉におけるCO₂発生量削減が喫緊の課題となっている。高炉でのCO₂発生量削減には、①還元材として使用されるコークスおよび微粉炭の還元材比低減、②水素系還元材使用によるC使用量低減が有効である。還元材比の低減には炉熱の制御や通気性の確保が重要である。水素系還元材としては、天然ガスや都市ガスが考えられるが、高炉下部から共に吹き込まれる微粉炭の燃焼性に及ぼす影響が懸念される。そこで本論文では、高炉における通気性改善技術として、既往の研究のまとめ(第2章)に続き、装入物分布制御技術として鉍石層へのコークス混合装入技術に注目し、小中塊コークスの混合制御(第3章)、塊コークスの混合制御(第4章)の検討を行った。また、水素系還元材使用時の高炉操業に及ぼす影響および微粉炭燃焼性に及ぼす吹込みランス配置の影響(第5章)、吹込みランス構造の影響(第6章)について検討した。

【第2章】装入物分布制御高炉内の通気性改善に有効な手段としては、高炉の主な装入物である鉱石（鉄鉱石と焼結鉱）およびコークスの反応性向上や高強度化が考えられるが、これらを炉内に装入する際に、炉半径方向に対する粒度分布やコークスと鉱石の層厚比の制御に加えて、鉱石層へのコークスの混合装入技術が有効とされている。なかでも炉内で最も圧力損失が大きい融着帯（鉱石の軟化融着が始まる領域）における通気性の改善対策として、近年、鉱石層へのコークス混合装入技術が注目されている。Isobe *et al.*[1]は、高炉内の温度分布、ガス組成、荷重を再現した荷重軟化実験装置を用いて鉱石層中へ混合するコークスの量が還

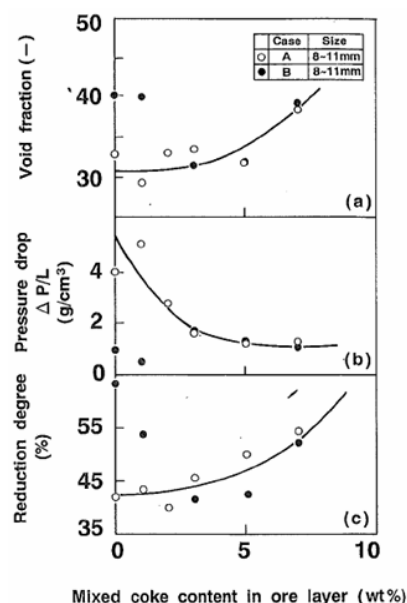


Fig. 1 Effect of mixing coke into ore layer on reduction properties of ore at 1150 °C.

元性および通気性に及ぼす影響を調査した。Figure 1 に結果を示す。混合コークス量の増加に伴い、鉱石層中の空隙率の増加、圧力損失の低下および還元率の向上が確認された。また、Mousa *et al.*[2]は、マッフル炉を用いた鉱石の混合還元試験を行った。(a)混合コークスなしの場合に対して、(b)混合コークスありの場合では、還元された鉄が分散し、還元が均一に進んでいることが確認された。これは混合コークスの存在により、還元で発生した緻密な還元鉄層の鉱石表面での凝集を防止し、ガス還元が進行しやすかったためとしている。

[微粉炭燃焼性改善]現在の高炉操業においては、将来の資源劣質化対策やコークス炉寿命延長の観点から微粉炭の多量吹き込みによるコークス使用量削減が志向されているが、燃焼性の低下に起因する通気性悪化が課題となっている。微粉炭の燃焼は、昇温、着火、ガス（揮発分）燃焼、固体（チャー）燃焼というステップで進行する[3]。微粉炭の燃焼性に及ぼす因子としては、微粉炭性状（揮発分量：VM）、送風条件（送風温度、酸素濃度）および微粉炭比（空気比）が挙げられる。Yamagata *et al.*[4]は、コークス充填層型の燃焼炉で各種因子が燃焼性に及ぼす影響を調査した。また、高炉操業においては、炉内に吹き込まれた微粉炭の酸素存在領域の滞在時間が20 ms以下と非常に短いため、熱源であり酸素供給源である熱風と微粉炭流の接触面積増加が有効とされてきた。そこで、Maki *et al.*[5]は、微粉炭吹き込みランスの本数および配置が燃焼性に及ぼす影響を検討し、Fig. 2 に示すように、ランス本数が1本より2本、また2本でも偏芯配置化により、微粉炭と熱風の接触面積が増加し、燃焼率が上昇することを示した。

【第3章】 鉱石層へのコークス混合装入については、塊コークスの整粒時に発生する篩下コークス(小中塊コークス)を鉱石層に混合する手法が現状の高炉操業では一般的であると考えられる。しかしながら、その混合量については小中塊コークスの発生割合に依存すると考えられ、混合方法についても各社、高炉ごとに違いがあると推定される。また原料層に混合されている小中塊コークスの排出挙動、混合性に関しては系統的に調査された例は少ない。そこで本章では、小中塊コークスの混合位置、混合方法が炉内装入時の混合性に及ぼす影響を調査した。

Figure 3 に縮尺模型実験結果を示す。混合位置、混合方法によらず、排出末期に混合率が上昇する傾向にあり、上流混合と比

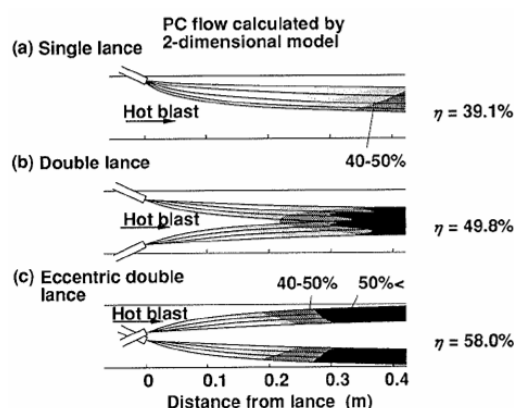


Fig.2 Effect of lance arrangement on pulverized coal flow where η : combustion efficiency measured by hot model (at 300mm from lance tip)

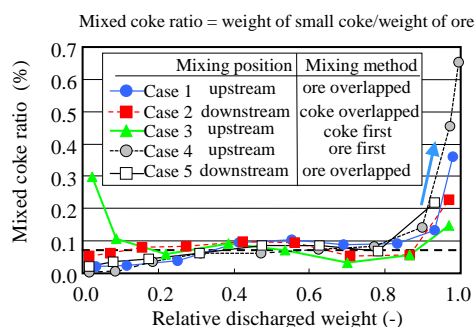


Fig.3 Change in discharged mixed coke ratio.

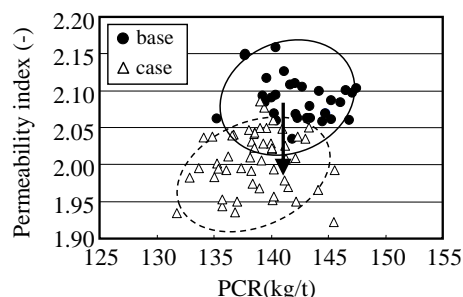


Fig.4 Relationship between PCR and Permeability index.

較して、下流混合のほうが平均混合率 0.08 に対してより均一となる。混合位置を下流混合として、混合方法を最適化し、福山 5 高炉に適用した結果を Fig. 4 に示す。微粉炭比の増加に伴い、炉内通気抵抗は増加するが、混合方法を最適化した case では、base に対して圧損が低下し、小中塊コークスの混合性改善の影響が示唆された。

【第 4 章】 混合装入において、塊コークス整粒時に発生する小中塊コークス量以上の混合量を設定する場合、塊コークスの混合が必要となるが、鉱石との密度差に加えて粒径差も拡大するため、混合時の塊コークスの分離・偏析が顕著になると考えられる。本章では、塊コークス混合時の新しい混合率制御技術として FCG（流量調整弁）ダイナミック制御法を考案し、塊コークスの混合性に及ぼす影響を検討した。Figure 5 に半径方向の混合率分布を示す。水準間で混合状況の変化が確認され、中心側のコークス混合率が高位の Base に対してコークス側の FCG 制御を実施する Coke、鉱石側の FCG を制御する Ore、コークス・鉱石両側の FCG を制御する Double では中心部への混合コークスの偏析が緩和されて中間部から周辺部にかけての混合率の上昇が確認された。本技術を千葉 6 高炉に適用した結果、コークス比 4.2kg/t(1%)の低減を達成した。

【第 5 章】 高炉での水素系還元材使用は CO₂ 削減に有効であるが、工業的には現在主流で吹きこまれている微粉炭との同時吹き込みになると想定される。本章では、水素系還元材(CH₄)吹き込み時のランス配置が微粉炭燃焼性に及ぼす影響について検討した。Figure 6, 7 に示すように CH₄ ランスが上流に配置される程、微粉炭の着火が促進した。さらに 2 本のランス先端間距離 D が $-20 \leq D \leq 0$ の範囲で着火位置の変動が減少し、安定した着火が確認された。

【第 6 章】 ランス配置の検討では、CH₄ 燃焼による急速加熱により微粉炭の着火が促進することが示唆された。そこで本章では、微粉炭と CH₄ を同一ランスから同時に吹き込む際のランス構造が燃焼性に及ぼす影響を調査した。実験に用いたランスの条件は Fig. 8 に示すように PC 単独(base), 2 重管 CH₄ 外管(case1), 2 重管 PC 外管(case2), PC+CH₄ 事前混合(case3)とした。実験結果を Fig. 9 に示す。ランスからの距離の増加に伴い、燃焼温度は増加傾向にあり、case1, case2, case3 の順

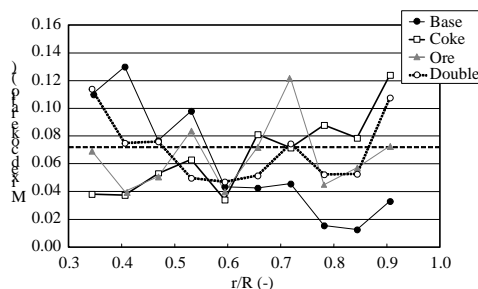


Fig.5 Effects of FCG dynamic control on radial distribution of the mixed coke ratio.

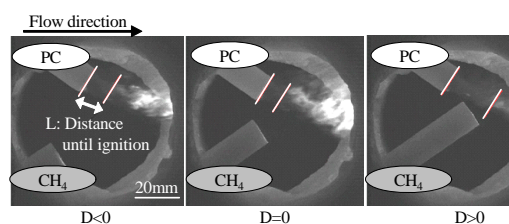


Fig. 6 Effect of lance arrangement with gas flow direction on ignition point.

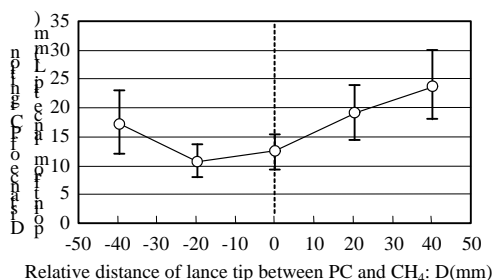


Fig.7 Influence of relative distance of lance tip with flow direction on PC ignition point.

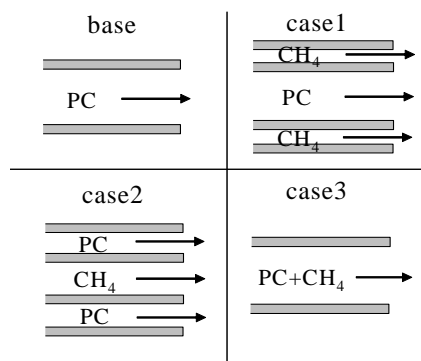


Fig. 8 Injection methods of pulverized coal and CH₄.

に燃焼温度は増加した。特に case3 ではランス先端近傍から温度が大幅に上昇した。CH₄ 同時吹き込み、吹き込み位置の変化によって燃焼性が大幅に変化することが確認された。

【第7章】 本論文では、高炉操業の高効率と低炭素化に向けて、装入物分布制御、微粉炭燃焼性改善の観点からアプローチし、基礎実験と数値解析から高炉の通気性改善に向けた新技術を検討した。実機で新技術の効果が確認され、CO₂ 排出量削減に繋がる新しい技術指針を得た。

【参考文献】

[1]M. Isobe *et al.*, *Proceedings of the 6th International Iron and Steel Congress*, (1990) 439-446. [2]Elsayed A.MOUSA *et al.*, *ISIJ International*, **51**(2011) 353-358. [3] K. Ishii, *Advanced Pulverized Coal Injection Technology and Blast Furnace Operation*, Pergamon Press, Oxford, (2000), 27. [4]C. Yamagata *et al.*, *ISIJ International*, **32**(1992) 725-732. [5]A. Maki *et al.*, *ISIJ International*, **36**(1996) 650-657.

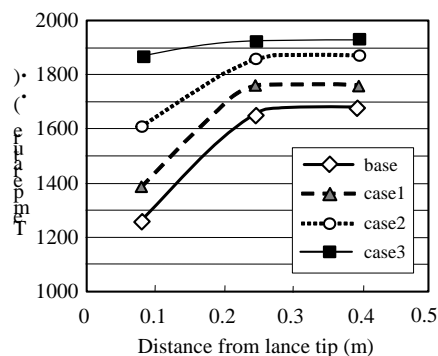


Fig.9 Relationship between distance from lance tip and temperature.

論文審査結果の要旨

温暖化に代表される地球環境問題を鑑みると、鉄鋼業ではCO₂排出量の削減が喫緊の課題となっている。本論文では、製鉄工程からの二酸化炭素排出量低減のために、その根幹をなす高炉での低還元材比操業を達成するために、2つの視点から検討を進めた。

一つは、現状の高炉操業における還元反応の高効率化、還元平衡制御の観点から高炉の装入物分布制御、中でも通気性に大きな影響を及ぼすといわれる鉬石層へのコークス混合装入技術の最適化について検討した。本研究では、装入装置や混合するコークスの粒径によって偏析現象が変化するため、その偏析現象を解明することで、制御手段を検討し、還元反応の高効率化に向けた最適装入方法の提案を行った。

二つ目は、高炉の還元材として炭素の代わりに水素を使用する観点からは、水素系還元材そのものが高炉操業において熱的、通氣的にどのように影響するかを把握するとともに、通気性およびガス流れ変化を介して炉壁熱負荷に大きな影響を及ぼすと考えられる微粉炭燃焼性に及ぼす影響について検討した。本研究では、高炉下部の羽口から水素系還元材が微粉炭とともに吹き込まれる際の競合燃焼時の現象を把握するとともに、吹込みランスの配置および構造が微粉炭燃焼性に及ぼす影響を調査し、通気性改善に向けた最適ランス配置、構造の提案を行った。

本論文は、全7章で構成されており、第1章は緒論として現状の環境問題や鉄の生産状況を整理した。第2章は、低還元材比操業を志向するにあたり、装入原料、コークスの性状改善や装入物分布制御に関する既往の研究、また水素系還元材吹き込みや、微粉炭燃焼に関する既往の研究を総括した。

第3章と第4章では、炉上部における装入物分布制御技術として鉬石層へのコークス混合装入について検討した。高炉内での小中塊コークスや塊コークスの鉬石層中の混合状況に及ぼす装入方法の影響を検討し、混合効果が低下する分離・偏析を防止する最適混合方法を小中塊コークス混合時、塊コークス混合時にそれぞれ提案した。それぞれに対応した実炉試験を実施し、効果を確認した。

第5章と第6章では、炉下部における水素系還元材使用時の微粉炭燃焼性に関する検討を行った。水素系還元材の燃焼による雰囲気温度上昇により、微粉炭の昇温が加速し、着火性が改善することを確認した。また、燃焼温度の上昇により、微粉炭の燃焼ガス化特性が改善するため、微粉炭と水素系還元材吹き込み位置の近接化が有効であることを確認した。

以上、本研究で得られた新技術を実機に展開することで、還元反応の高効率化、微粉炭燃焼性の改善を通じて、CO₂排出量削減に寄与できることが期待される。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。